

长距离重力流输水管线水锤计算及防护研究

张雷^{1,4}, 李明², 佟继有³, 张海丽³, 王勇², 郝伯瑾^{1,4}

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2. 江苏大学 流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013; 3. 兴安盟河海供水有限公司, 内蒙古 乌兰浩特 137400; 4. 河南省水电工程磨蚀测试与防护工程技术研究中心, 河南 郑州 450003)

摘要: 为进一步研究长距离重力流输水管线的水锤现象, 以兴安盟经济技术开发区工业供水工程为背景, 根据一维水锤计算基本原理, 计算分析了阀门两阶段线性关闭快慢和组合关闭方式对长距离重力流输水管线水锤作用的规律, 并在此基础上研究了关阀总时间对管线水锤压力的影响。结果表明: 阀门第1阶段快速关闭的幅度越大, 则管线沿程水锤压力越大; 阀门同时关闭时管线水锤压力较大, 交错关闭时水锤压力较小; 延长关阀总时间有利于减小管线水锤压力, 该工程两阶段线性关闭最佳历时为1 400 s。该研究对长距离重力流输水管线的安全运行具有一定的参考作用。

关键词: 长距离重力流; 输水管线; 关阀水锤; 线性关阀; 组合关阀; 水锤防护

中图分类号: TV674

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)01-0121-06

Calculation and prevention of water hammer for long distance gravity flow water conveyance pipelines

ZHANG Lei^{1,4}, LI Ming², TONG Jiyu³, ZHANG Haili³, WANG Yong², HAO Bojin^{1,4}

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China; 2. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 3. Hinggan League Hehai Water Supply Co., Ltd., Ulanhot 137400, China; 4. Henan Engineering Research Center of Hydropower Engineering Abrasion Testing and Protection, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In order to further study the water hammer phenomenon in long distance gravity flow water conveyance pipelines, the industrial water supply project in Hinggan League Economic and Technological Development Zone was taken as the research object to study the influence of two-stage linear closing speed and combined valve closing schemes on the water hammer in the long distance gravity flow water conveyance pipeline, according to the basic principle of one-dimensional water hammer calculation. On this basis, the influence of total valve closing time on pipeline water hammer pressure was studied. The results indicate that the water hammer pressure along the pipeline increases with the increase of the opening of the rapid closing valve in the first stage; when the valves are closed at the same time, the water hammer pressure of the pipeline is large, and when the valves are closed alternately, the water hammer pressure is relatively small; prolonging the total valve closing time is conducive to reducing the water hammer pressure of the pipeline, and the optimal duration for two-stage linear closing of the project is 1,400 s. The study has a certain guiding value for the safe operation of long distance gravity flow water conveyance pipelines.

Key words: long distance gravity flow; water conveyance pipeline; valve closing water hammer; linear valve closing; combined valve closing scheme; water hammer prevention

收稿日期: 2022-05-12; 修回日期: 2022-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1965110、52279134), 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(HKY-JBYW-2022-01)

作者简介: 张雷(1982-), 男, 山东青州人, 博士, 正高级工程师, 硕士生导师, 研究方向为水工建筑物检测、监测和加固修复技术。

1 研究背景

我国幅员辽阔,水资源地域分布不均是影响区域性经济发展的重要因素^[1-2]。近年来,长距离重力流输水管线因其不需要额外增设动力设备、沿程水量损失小、污染小等优点,在跨地区、跨流域等输水工程中得到了广泛应用^[3-6],一定程度上缓解了水资源地域分布不均的问题。然而,长距离重力流输水管线的布置受地形和人类建筑的影响较大,无法完全实现最佳布置方案,因此增加了其运行风险^[7]。各类水锤现象是长距离重力流输水工程面临的重大问题,输水管路和各类元器件的破坏以及管路周边发生的水事故大多与水锤现象有关^[8],因此有必要对长距离重力流输水工程潜在的水锤现象进行诊断并加以预防。

对水锤的防护首先需要对水锤产生机理进行深入了解,国内外学者在对水锤现象的微观机理进行研究时,多采用三维数值模拟和物理模型试验的方法,根据几何相似建立小尺度模型进行模拟分析,Tang 等^[9]采用 CFD(computational fluid dynamics)方法对直管路不考虑空化和考虑空化时的水力过渡过程进行了计算分析;Nikpour 等^[10]采用实验和数值模拟的方法,发现 CFD 可以成功地应用于水锤现象的模拟;卢坤铭等^[11-12]采用三维 CFD 方法对起伏管道内水-气耦合作用的瞬变过程进行建模和模拟,揭示了含气水锤的瞬变特性;Warda 等^[13]采用三维 CFD 方法对具有坡度的直管路系统进行了水柱分离研究,并同试验结果进行了对比分析,验证了其可靠性。

目前对于长距离重力流管路水锤的防护大多采取两类措施,一是在管线沿程合理布置调压室^[14]、

空气罐^[15]、止回阀^[16]等防护装置,二是制定合理的阀门启闭程序^[17-18]。阀门的不合理启闭是长距离重力流管线产生水锤现象的常见原因,部分学者通过制定合理的关阀程序对长距离重力流输水管线的关阀水锤进行防护^[19-20],然而相关方面的研究还比较少,同时并未对阀门关闭方式对水锤影响的深层原因进行进一步探讨,此外,关于多支管路上的阀门组合关闭方式对管路水锤的影响也少有研究。

因此,在以往研究经验的基础上,本研究基于内蒙古自治区兴安盟经济技术开发区工业供水工程,以数值计算的方法对长距离重力流输水管线关阀水锤作进一步研究,对阀门关闭快慢造成的水锤差异进行深入分析,同时探讨了支路阀门组合关闭方式对管路水锤的影响,研究结果可为长距离重力流输水工程的优化设计和安全运行提供技术支撑。

2 工程概况与计算方法

2.1 工程概况

内蒙古自治区兴安盟经济技术开发区工业供水工程以察尔森水库为水源,依靠重力将水输送至工业区净水厂配水室,将取水头部稳压池水位控制为 339 m,末端净水厂配水室水位控制为 306 m,该工程供水规模约为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (单排管线约为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),管线全长 55.40 km,其中取水头部至景观段(a段)长 34.27 km,景观段(b段)长 1.80 km,景观至隧洞前段(c段)长 15.49 km,隧洞至净水厂配水室(d段)长 3.84 km,隧洞之前的大部分管线以及隧洞出口至净水厂配水室段采用双排管线布置,管材主要采用钢管、PCCP 管、球墨铸铁管等,管径大小并不固定,管线末端配置有调流调压阀(阀门 A、B),该供水工程管线布置示意图及沿程高程走势如图 1、2 所示。

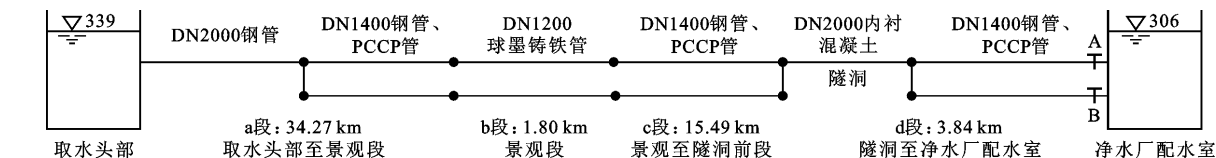


图1 供水工程输水管线布置示意图

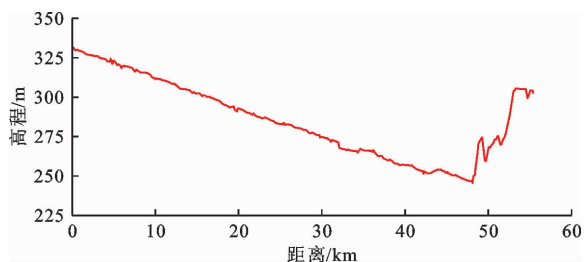


图2 供水工程输水管线沿程高程走势

2.2 水锤计算方法

长距离重力流输水管道水锤常采用特征线法进行计算。其瞬态流动基本微分方程由运动方程和连续性方程两部分组成^[21]。

根据牛顿第二定律可以推出微元流体的运动方程:

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{f}{D} \frac{V |V|}{2g} = 0 \quad (1)$$

根据质量守恒定律,可以得到水锤计算连续性方程:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V\left(\frac{\partial H}{\partial x} + \sin \alpha\right) + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \tag{2}$$

式中: H 为管路中某点的水头,m; f 为管路摩擦系数; V 为管内水流流速,m/s; a 为水锤波传播速度,m/s; α 为管线与水平夹角,(°); x 为沿管轴向的位置坐标,m; t 为时间,s; g 为重力加速度,m/s²。

将上述方程采用特征线法进行转化,得到有压管道瞬变流流动暂态计算的特征线方程:

$$C^+ : \frac{dH}{dt} + \frac{a}{g} \frac{dV}{dt} - V \sin \alpha + \frac{af}{Dg} \frac{V|V|}{2} = 0,$$
$$\frac{dx}{dt} = V + a \tag{3}$$

$$C^- : \frac{dH}{dt} - \frac{a}{g} \frac{dV}{dt} + V \sin \alpha - \frac{af}{Dg} \frac{V|V|}{2} = 0,$$
$$\frac{dx}{dt} = V - a \tag{4}$$

式中: D 为管路直径,m。

3 结果与分析

3.1 阀门关闭快慢对管线水锤压力的影响

采用“先快后慢”的阀门关闭方式研究阀门关闭快慢对管线水锤压力的影响。其中,“快关”是指在较短的时间内线性关闭阀门的大部分开度,“慢关”是指在较长时间内线性关闭阀门的较少开度。通过控制阀门在“快关”和“慢关”两阶段线性关闭开度的大小,可以确定阀门的该操作方式对长距离重力流输水管线水锤压力的影响。在本次计算分析中,设定管线末端两个阀门同时动作,固定关阀总时间为 240 s,其中,阀门快速关闭时间为 80 s,缓慢关闭时间为 160 s。

图 3 为阀门在不同线性关闭方式下管线沿程压力分布,表 1 为不同线性关阀方式下阀前管线沿程压力极值。

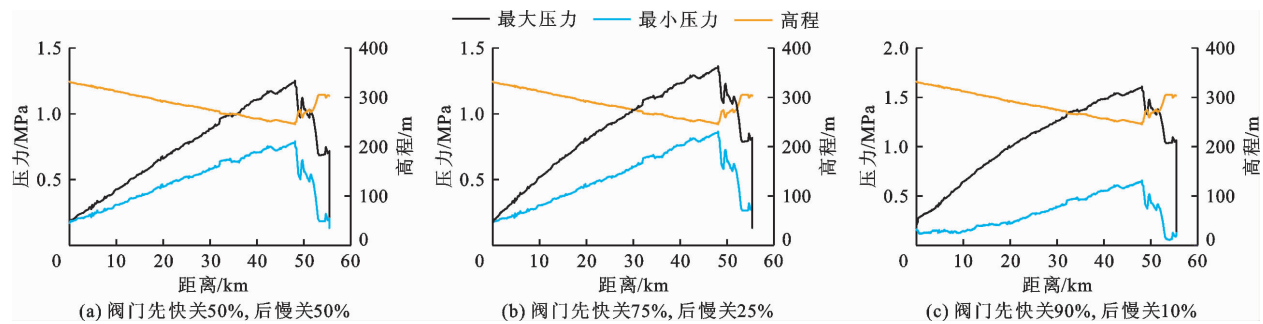


图 3 阀门在不同线性关闭方式下管线沿程压力变化

表 1 不同线性关阀方式下阀前管线压力极值 MPa

线性关阀方式	最大压力	最小压力
快关 50%,慢关 50%	1.252	0.167
快关 75%,慢关 25%	1.362	0.167
快关 90%,慢关 10%	1.610	0.055

从图 3 和表 1 可以看出,随着阀门在快关阶段关闭幅度的增大,管线沿程最大压力值也逐渐增大,而最小压力值缓慢减小,这是因为水锤现象的本质是流体动能和压力能的相互转化,在相同的时间内,阀门关闭的开度越大,管内流体流通面积减小得越快,更多流体受到阻隔,动能转化为压力能越多,因此管线总体压力升高较快,同时,由于第一阶段已经关闭了大部分阀门,最初产生的水锤波反射回阀门处时只有小部分被抵消,因此管线总体压力值更大;而当流体由于自身惯性受拉时,流体体积膨胀,密度减小,压力降低,而且流体局部流速越大,则这种由

于惯性而导致流体局部压力降低的幅度越大,这与最初的水锤压力值呈正相关关系,尽管第二阶段阀门在较长时间内关闭较小开度,但此时阀门开度的变化相对于第一阶段来说非常小,因此水锤压力仍然由第一阶段关阀主导,说明在选择“先快后慢”的关阀方式时,要减小管线水锤压力,应尽可能减小在第一阶段阀门的关闭幅度。

3.2 阀门组合关闭方式对管线水锤压力的影响

实际运行环境下,输水管线末端阀门存在不同的组合关闭方式。图 4 为输水管线末端两个阀门在同时关闭、一阀门先关闭运行一半时间,随后另一阀门开始关闭、一阀门完全关闭后,另一阀门开始关闭 3 种不同组合关闭方式下管线沿程压力分布,表 2 为两阀门在 3 种不同组合关闭方式下阀前管线沿程压力极值。设定 3 种组合关闭方式的阀门关闭总时间均为 240 s,每个阀门关闭方式均为先线性快关 80 s,后线性慢关 160 s。

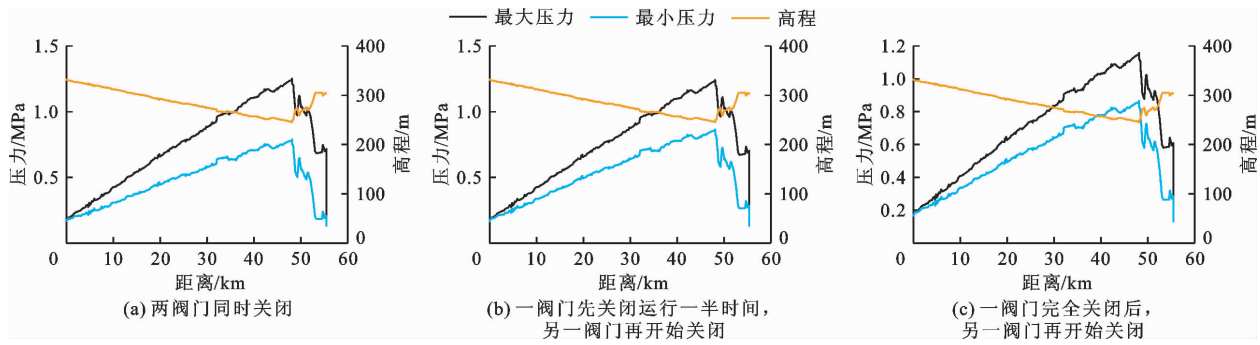


图4 两阀门在3种不同组合关闭方式下管线沿程压力分布

表2 两阀门不同组合关阀方式下阀前管线压力极值

组合关闭方式	MPa	
	最大压力	最小压力
两阀门同时关闭	1.252	0.167
一阀门先关闭运行一半时间,另一阀门再开始关闭	1.242	0.167
一阀门完全关闭后,另一阀门再开始关闭	1.149	0.167

由图4和表2可以看出,管线末端两阀门同时关闭时,管线沿程最大压力值更大;一阀门先关闭运行一半时间,另一阀门再开始关闭时,管线沿程最大压力值稍小;一阀门完全关闭后,另一阀门再开始关闭时,管线沿程最大压力值最小。这是因为管线末端阀门同时关闭时,在不考虑其他因素的情况下,产生的水锤波具有相同的相,在向上游传播时容易叠加从而导致压力增大;当两阀门交错关闭时,水锤波

在向上游传播过程中则会因为相位的不同而抵消一部分压力,因此表现为压力值较小。说明存在并排管线时,阀门的组合关闭应避免水锤波的相互叠加。

3.3 关阀总历时对管线水锤压力的影响

管线末端阀门关闭总历时过小容易引起管道水锤压力急剧升高,甚至造成爆管,合理设置阀门关闭总历时对于管线水锤防护具有重要意义。为便于分析,在上述计算基础上,选择管线末端阀门同时在关阀总历时的前1/3内线性快关50%,然后在剩余时间线性将阀门全部关闭的方式,以获取该关阀方式下关阀总历时的最佳值。根据《城镇供水长距离输水管(渠)道工程技术规程》(CECS 193:2005),限定本次水锤计算正压上限为1.3倍的最大工作压力,水锤计算负压下限根据经验暂取常规值-0.39 MPa。图5~7为不同关阀总历时下的管线沿程各段压力分布。

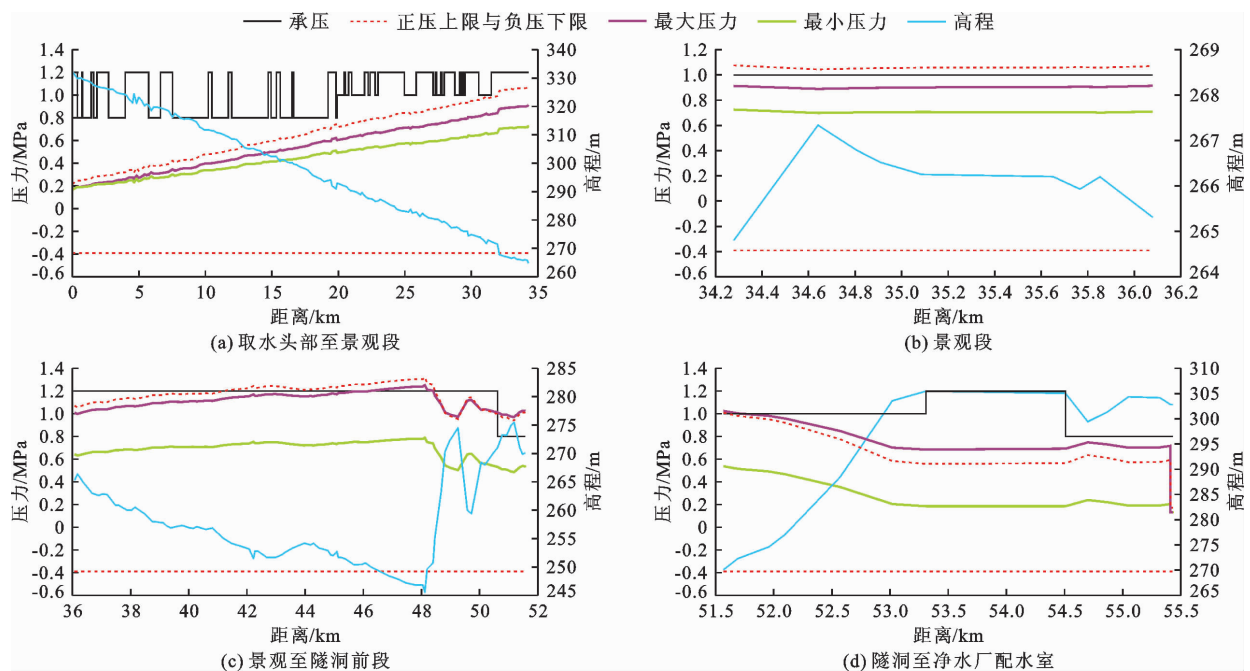


图5 240 s 关阀总历时管线沿程各段压力分布

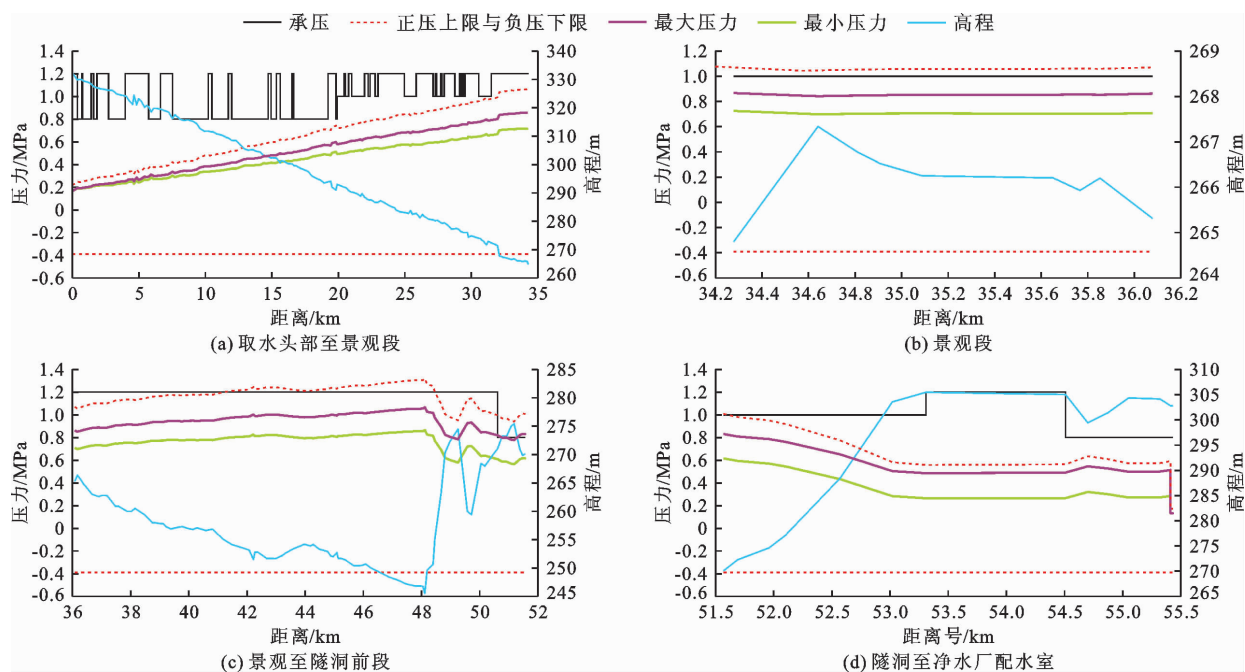


图6 840 s 关阀总历时管线沿程各段压力分布

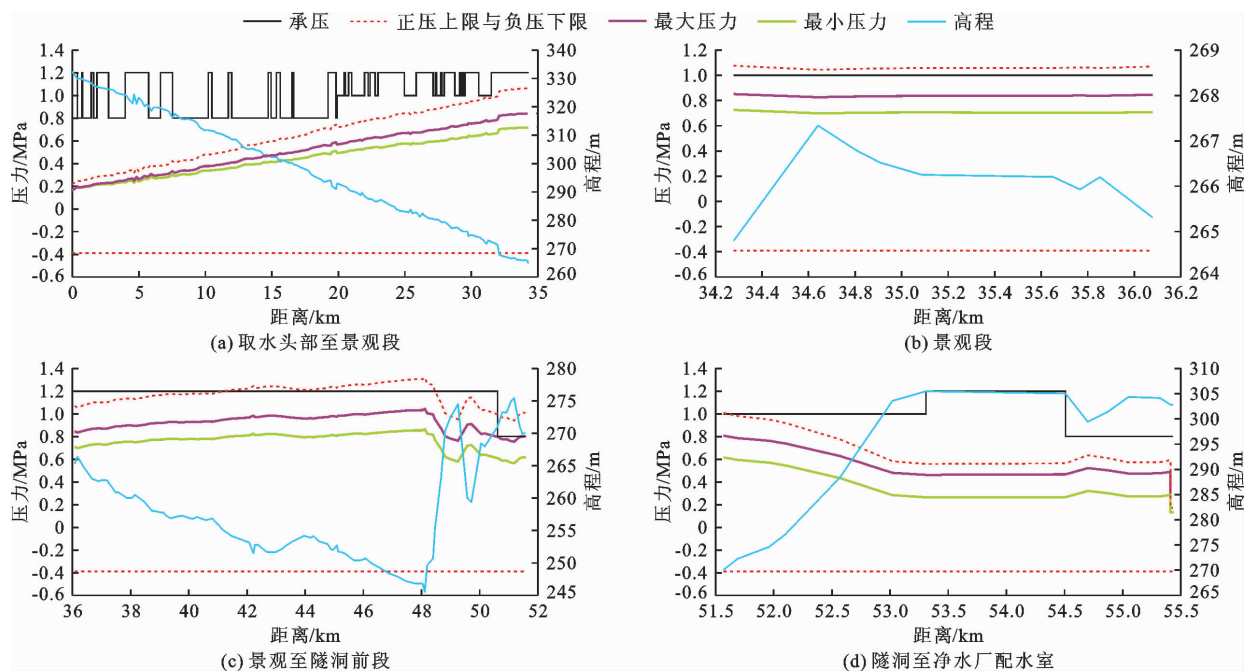


图7 1400 s 关阀总历时管线沿程各段压力分布

由图5~7可以看出,当关阀总时间为240 s时,景观至隧洞前段(图5(c))某处管线最大压力超过了管道设计承压值,甚至超过了正压上限,极易引发爆管事故,故该方案是不可取的;当关阀总历时为840 s时,景观至隧洞前段(图6(c))管线最大压力均在正压上限范围内,但是某处压力超过了管道设计承压值,也存在一定风险,不可长时间运行;当关阀总历时为1400 s时,管线沿程各处压力均位于安全范围内,因此,该方案可以保证设计流量下管路

系统的安全运行。

4 结 论

本文以内蒙古自治区兴安盟经济技术开发区工业供水工程为背景,根据一维水锤计算基本原理,计算分析了阀门两阶段线性关闭快慢和组合关闭方式对长距离重力输水管线水锤的作用规律,对各类关阀方式造成的不同水锤压力的原因进行了解释,并最终得到了关阀总历时对管线水锤压力的影响,

主要结论如下:

(1)对于长距离重力流输水管线关阀水锤的防护,在采用“先快后慢”两阶段线性关阀方案时,“快关”阶段关闭的幅度越大,则水锤压力越大。因此,实际操作时,在“快关”阶段应尽可能减小阀门的关闭幅度,关阀总历时可以适当延长。

(2)当管线存在并列布置的阀门时,若各支路阀门启闭程序一致,容易造成水锤波相互叠加,从而产生更大的水锤压力。因此,对于具有支路的管路,要避免阀门组合关闭时引起的水锤波相互叠加。

(3)考虑到管路水锤大多是由于管线中的动作元件(如阀门)的不合理运行导致的,故提出了阀门操作的合理化建议和禁忌作业。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 2019 年度中国水资源公报 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [2] 左其亭, 纪璎芯, 韩春辉, 等. 基于 GIS 分析的水资源分布空间均衡计算方法及应用[J]. 水电能源科学, 2018, 36(6): 33-36.
- [3] 杨开林. 长距离输水水力控制的研究进展与前沿科学问题[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 424-435.
- [4] 蒙世任, 朱新民, 崔 炜, 等. 广西百色水库灌区长距离输水管道设计研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(5): 347-353.
- [5] 翟家齐, 赵 勇, 赵纪芳, 等. 南水北调来水对京津冀地区用水竞争力的影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(3): 440-450.
- [6] 宋子奇, 方国华, 闻 昕, 等. 基于能值分析的跨流域引调水工程生态效益计算[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(5): 56-61.
- [7] 郭伟奇, 吴建华, 李 娜, 等. 长距离重力流输水系统水锤防护措施研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(11): 124-126+130.
- [8] 李建宇, 魏举旺. 长距离重力流输水管线末端关阀水锤分析及防护[J]. 中国给水排水, 2022, 38(7): 51-55.
- [9] TANG Xuelin, DUAN Xiangyu, GAO Hui, et al. CFD investigations of transient cavitation flows in pipeline based on weakly-compressible model[J]. Water, 2020, 12(2): 448.
- [10] NIKPOUR M R, NAZEMI A H, DALIR A H, et al. Experimental and numerical simulation of water hammer[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2014, 39: 2669-2675.
- [11] 卢坤铭, 周 领, 曹 波, 等. 起伏管道内水流冲击滞留气团的三维动态特性模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(4): 384-389+402.
- [12] 卢坤铭, 周 领, 刘 静. 水流冲击多段滞留气团的三维数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(3): 264-269.
- [13] WARDA H A, WAHBA E M, EI-DIN M S. Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation of liquid column separation in pipe transients[J]. Alexandria Engineering Journal, 2020, 59(5): 3451-3462.
- [14] 童 祥, 张晓宏, 张俊发. 调压室阻抗孔尺寸选择的研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(4): 168-171+176.
- [15] 王思琪, 俞晓东, 倪尉翔, 等. 长距离供水工程空气罐调压塔联合防护水锤[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(5): 406-412.
- [16] 刘丰年, 曹 彬, 欧阳建新, 等. 静音式止回阀防水锤分析[J]. 给水排水, 2019, 55(2): 22-24+30.
- [17] 杨瑞虎, 王 彤, 尚渝钧, 等. 供水管网气液两相流关阀水锤[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(6): 596-602.
- [18] 陈亚飞, 顾卫国, 王德忠, 等. 球型调节阀关阀水锤效应的试验研究与数值计算[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(10): 1027-1032.
- [19] 杨晓蕾, 沈来新, 俞 锋, 等. 重力流输水管道关阀水锤模拟研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(5): 95-96+127.
- [20] 罗 浩, 张 健, 蒋梦露, 等. 长距离高落差重力流供水工程的关阀水锤[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(1): 131-135.
- [21] 孙一鸣, 吴建华, 李 琨, 等. 有压输水系统的水锤防护研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(1): 152-155+164.